文章编号:1673-9469(2024)03-0032-07

DOI:10. 3969/j. issn. 1673-9469. 2024. 03. 005

# 不同材料对碱激发混凝土抗碳化性能影响研究

**王洪全**,范 宏<sup>\*</sup>,牛宝乐,王 祥,万小梅 (青岛理工大学 土木工程学院,山东 青岛 266520)

摘要:针对碱激发材料存在抗碳化性能差等缺点,以及对碱激发材料的碳化研究手段还缺乏统一标准。提出了一种硬化混凝土粉末碳化测试方法,结合不同掺量的草木灰、氧化镁、乳酸钠、煅烧水滑石(C-HT)的碱激发矿渣-粉煤灰砂浆(AAM)的抗碳化性能进行研究。试验结果表明:添加草木灰时,AAM 抗碳化性能下降,但随着其掺量增加,AAM 抗碳化性能逐渐提高,掺量为6%时,AAM 抗碳化性能与对照组相差较小;氧化镁、乳酸钠、C-HT 均可提高 AAM 的抗碳化性能,添加6%氧化镁或6%C-HT 的效果最明显;乳酸钠对于 AAM 抗碳化性能提高并不显著。硬化粉末碳化测试方法不仅用于测试 AAM 的抗碳化性能,而且可以利用碳化程度和速率对不同添加剂进行抗碳化性能的精确对比。

关键词:碳化程度;碳酸钙含量;粉末碳化;碱激发混凝土;碳化速率 中图分类号:TU528 文献标识码:A

## Study on the Effect of Different Materials on the Anti-carbonation Properties of Alkali-activated Concrete

WANG Hongquan, FAN Hong\*, NIU Baole, WANG Xiang, WAN Xiaomei

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266520, China)

**Abstract**: Alkali-activated materials are one of the environmentally friendly materials that are expected to replace cement, but they have disadvantages such as poor resistance to carbonation and there is a lack of unified standards for carbonation research methods for alkali-activated materials. This article proposes a method for testing the carbonation of hardened concrete powder, and studies the carbonation resistance of alkali-activated slag-fly ash mortar (AAM) containing different dosages of plant ash, MgO, Sodium lactate, and C-HT. The experimental results show that when adding plant ash, the carbonation resistance of AAM decreases. However, as the dosage of plant ash increases, the carbonation resistance of the control group. MgO, Sodium lactate, and C-HT can all improve the carbonation resistance of AAM. The effect is most significant when adding 6% MgO or 6% C-HT. Sodium lactate does not significantly improve the carbonation resistance of AAM. The hardened powder carbonation testing method is not only used to test the carbonation resistance of AAM, but can also be used to accurately compare the carbonation resistance of different additives by measuring the degree and rate of carbonation.

Key words: carbonization extent; calcium carbonate content; powder carbonization; Alkali excites concrete; carbonization rate

伴随着社会对建筑基础设施需求增加,水泥 的消耗量不断攀升,对环境造成了很大的污染,其 中每年的 CO<sub>2</sub> 排放量达到 1.50 亿 t 左右,占全世 界排放量的 8%<sup>[1]</sup>。碱激发胶凝材料作为一种新型绿色建筑材料,对于提高工业固体废料的利用率、减少 CO<sub>2</sub> 气体排放等方面有着显著的优势,因

收稿日期:2023-07-26

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51878365)

作者简介:王洪全(1997-),男,山东潍坊人,硕士研究生,主要从事混凝土结构耐久性研究。

<sup>\*</sup>通信作者:范宏(1967-),男,甘肃庆阳人,博士,副教授,主要从事混凝土结构耐久性研究。

此碱激发胶凝材料将会是未来的发展方向。但是 碱激发矿渣-粉煤灰砂浆(Alkali-Stimulated Mortar, AAM)比普通硅酸盐水泥(Ordinary Portland Cement,OPC)的碳化严重,为使 AAM 更好地替代 OPC,研究 AAM 的碳化有其实际意义。

Dung 等<sup>[2]</sup>发现,添加氧化镁(MgO)可以提高 碱激发矿渣混凝土的抗压和抗碳化能力。Bernal 等<sup>[3]</sup>发现在较低 CO,浓度条件下,矿渣中 MgO 含 量越高,碳化深度越小。矿渣中有较高 MgO 含量 时可以改善反应的程度,而且有利于水滑石的形 成,水滑石可以作为内部的二氧化碳吸附剂,MgO 含量越多,水化程度越高,早期抗压强度越高,矿 渣中 MgO 含量的增加,导致 C-S-H 对 Al 的吸收减 少,抗压强度显著提高<sup>[4-10]</sup>。MgO 可以提高 AAM 的抗碳化性能,是因为当胶凝材料中镁含量较高 时,形成稳定的含镁无定形 CaCO,相,从而抑制了 C-A-S-H 凝胶脱钙<sup>[11]</sup>, Lee 等<sup>[12]</sup> 通过快速碳化 (5% CO<sub>2</sub>)研究了添加 MgO 时的碱激发矿渣-粉煤 灰的抗碳化性能,AAM 经历快速碳化后,强度均比 未碳化的强度低,碳化深度随 MgO 含量的增加而 降低,与未碳化的试件相比,碳化样品中 MgO 所对 应的 XRD 峰强度降低,表明 MgO 与 CO<sub>2</sub> 反应析出 碳酸镁和无定形类水滑石相,并且 MgO 掺量(5%、 10%)不同,碳化产物的类型也不相同。Zhou 等<sup>[13]</sup> 发现乳酸盐可以使矿渣的溶解速度加快,从而得 到更多的水化产物和更高的力学性能。乳酸钠可 加速粉煤灰或矿渣的水化和强度发展<sup>[14]</sup>。Cheah 等[15]利用粉煤灰与高钙木灰成功制备了地聚物承 重块,提高抗压强度主要是因为高钙木灰中含有 的氧化钾对粉煤灰的活化作用。水滑石(Hydrotalcite, HT) 通过煅烧形成层状双金属氧化物(Calcined Hydrotalc, C-HT),当其加入到阴离子溶液 中,可以重建 HT的结构。Shui 等<sup>[16]</sup>发现 C-HT 可 以有效提高 OPC 抗碳化能力。这是由于 C-HT 的层 间阴离子交换能力<sup>[17]</sup>和结构重建记忆效应<sup>[18]</sup>,将 侵入的 CO<sub>2</sub> 固定为 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>的形式,减少了孔隙溶液 中碱性的消耗。Zhang 等<sup>[19]</sup>通过向以 NaOH 为激发 剂的碱激发矿渣(Alkali-Activated Slag, AAS)基质中 外掺 C-HT 发现,由于 C-HT 的记忆效应,可以重建 层状结构,形成类水滑石相。类水滑石相作为缓冲 体系吸收大气中侵入 AAS 砂浆的 CO<sub>2</sub>,延缓了 C-A-S-H 的脱钙。同时, C-HT 的加入降低了砂浆孔隙 度,使砂浆致密化,抑制了 CO<sub>2</sub> 在砂浆中的扩散,提 高了抗碳化能力。

基于上述原因,不同添加剂对矿渣-粉煤灰混 凝土抗碳化性能影响规律缺乏统一的认识,所以 本文以添加草木灰、MgO、乳酸钠、C-HT 四种材料 为研究对象,通过不同材料碳化前后的抗压性能、 碳化深度,以及碳化程度,分析四种材料对碱激发 混凝土抗碳化性能的影响规律。

#### 1 试验

#### 1.1 原材料与配合比

所用粉煤灰为二级 F 类; 矿渣粉为 S95 级; 碱 激发剂为 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>+NaOH, 混合后模数为 1.6。采 用天然河砂, 细度模数为 2.7。试验一共浇筑 13 种砂浆, M1 为对照组, M2—M13 是以 M1 为基础, 分别添加不同质量比例(矿渣和粉煤灰总量的 2%、 4%、6%)的草木灰、MgO、乳酸钠、C-HT, 实验中发现 当掺量为 6%时, 混凝土抗碳化性能提高明显, 所以 并未进行高掺量比试验。具体配合比见表 1。

(单位:kg/m<sup>3</sup>)

Tab. 1 Mortar mixing ratio  $(unit: kg/m^3)$ 煅烧水滑石 编号 矿渣 粉煤灰 水玻璃 氢氧化钠 砂 水 草木灰 氧化镁 乳酸钠 M1327 327 313 41 1 111 106 0 0 0 0 M2 327 327 313 41 1 111 106 13 0 0 0 0 M3 327 327 313 41 1 111 106 26 0 0 0 M4 327 327 313 41 1 111 106 39 0 0 0 13 0 0 M5 327 327 313 41 1 111 106 0 0 0 M6 327 327 313 41 1 111 106 26 41 0 39 0 0 M7 327 327 313 1 111 106 M8 327 41 1 111 106 0 0 13 0 327 313 M9 327 41 106 0 0 26 0 327 313 1 111 M10 327 327 313 41 1 111 106 0 0 39 0 327 327 41 0 0 0 13 M11 313 1 111 106 0 0 26 M12 327 327 313 41 1 111 106 0 M13 327 327 313 41 1 111 106 0 0 0 39

表1 砂浆配合比

#### 1.2 试件制备

在实验室制作成型 70.7 mm×70.7 mm× 70.7 mm 的立方体试块,在温度(20±2)℃、相对湿 度>95%标准养护条件下养护至 28 d。

#### 1.3 抗压强度试验

根据《混凝土物理力学性能试验方法标准》 (GB/T 50081—2019)<sup>[20]</sup>,具体为在标准养护龄期为 3、7、28、56 d,快速碳化 28 d 时使用型号为 YAW-3000D 的全自动电液伺服压力试验机进行试验。

#### 1.4 碳化环境与检测方法

采用《普通混凝土长期性能和耐久性能试验 方法标准》(GB/T 50082—2009)<sup>[21]</sup>中的碳化实验 方法,在养护 28 d 后进行不同龄期的碳化。根据 Bernal 等<sup>[22]</sup>的研究,在碱激发材料加速碳化试验 中,当 CO<sub>2</sub> 浓度高于 1%时,快速碳化的试验结果 与自然碳化的试验结果相比,发现溶解的碳酸盐/ 碳酸氢盐平衡发生了显著变化,不利于粉末检测 方法的实施。因此,将待测试样放置在温度(20± 5)℃、CO<sub>2</sub> 浓度(1±0.1)%、相对湿度(65±5)%的 碳化箱中进行快速碳化。粉末碳化是将养护好的 硬化体取芯磨粉后,将粉末一部分置于温度(20± 5)℃、CO<sub>2</sub> 浓度(0.03±0.01)%、相对湿度(60± 5)%的自然环境下进行碳化,另一部分放入碳化 箱中进行快速碳化。

碳化深度采用两种方法测量:一种是采用 1% 酚酞酒精溶液做指示剂来测定,将碳化好的试块 进行切割,去掉截面表层碎屑后,喷涂溶液,用游 标卡尺测定未呈色截面的深度,即为完全碳化深 度;另外一种是利用混凝土自动剖面磨削机对试 件由表及里进行打磨,打磨厚度为1 mm,将其打磨 取粉,利用精密混凝土碳化测量仪<sup>[23]</sup>测出每层粉 末 CaCO<sub>3</sub> 含量,当 CaCO<sub>3</sub> 含量稳定时,即为碳化 深度。

碳化程度测量是在试块养护好之后,直接取 芯磨粉,将粉末放置于10 mm×10 mm×15 mm 的塑 料方套中,首先在未碳化前测出粉末中 CaCO<sub>3</sub>含 量,然后放置于碳化箱和自然环境中碳化至待测 龄期。利用精密混凝土碳化测量仪对不同碳化龄 期粉末中的 CaCO<sub>3</sub>含量进行测试,用粉末单位时 间内 CaCO<sub>3</sub>生成量与完全碳化时 CaCO<sub>3</sub>生成量的 比值作为碳化程度,单位时间内 CaCO<sub>3</sub>生成量与 时间的比值作为碳化速率。

#### 2 结果与分析

#### 2.1 抗压强度

在标准养护条件下养护 28 d,然后进行快速 碳化 28 d 后发现除 C-HT 掺量组外,其他组抗压强 度均呈下降趋势,具体数据如图 1 所示。

如图 1(a)所示,草木灰可以提高抗压强度,M4 组 56 d 抗压强度为 67.8 MPa, 而 M1 为 56.9 MPa, 原因是草木灰中含有高碱性 K<sub>2</sub>O,并且草木灰中含 有大量的钙离子,可提高碱激发材料的力学性能, 而且钙离子有助于延长粉煤灰的溶解,从而提高 抗压强度<sup>[24-25]</sup>。如图 1(b)所示,加入 MgO 后抗压 强度增加, M5 组 56 d 时抗压强度为 81 MPa, 相对 于 M1 大幅度提升,是由于 MgO 的早期水化可加 速碱激发反应的过程,使得试件的早期强度提高。 并且会有水镁石及水滑石的形成,增加了试件的 密度,使试件的抗压强度提高。如图1(c)所示,掺 加乳酸钠后抗压强度提升,提升幅度和草木灰相 似,其原因为乳酸钠可使矿渣玻璃体的溶解度大 大增加,砂浆中的 Mg、Al、Ca、Si 浓度增加,乳酸钠 还可以使粉煤灰溶解度增加,因此会有更多的水 化产物(钙矾石、C-S-H)的沉淀。而且乳酸阴离子 的配位键被破坏,会增加矿渣的溶解,此外,乳酸 可以与硅离子和其他金属离子形成络合物,削弱 了氧的桥接作用,增加了硅离子从矿渣中溶解的 发生<sup>[13]</sup>,最终有助于试件抗压强度的提升。如图 1(d)所示,加入 C-HT 使试件抗压强度提高,并且 在所有掺量中提升最为显著,56 d 时 M13 组强度 为82.2 MPa,原因与其在碱激发过程中的催化作 用有关<sup>[26]</sup>, C-HT 的加入加速了 Al<sup>3+</sup>与 Si<sup>4+</sup>离子的 碱激发过程,随后合成了更多的铝硅酸盐,增强了 抗压强度。C-HT 还具有"层间蓄水功能",当混凝 土中自由水含量减小时,C-HT 可以不断释放水 分,促进胶凝材料在水化后期的水化程度,从而使 结构更加紧密<sup>[27]</sup>。快速碳化 28 d 后,三种掺量的 抗压强度均下降。可能的原因是以水玻璃为激发 剂时,碳化引起的 C-S-H 凝胶脱钙和无定形凝胶 的产生,导致产物的总体积减小<sup>[28]</sup>,产生裂缝,裂 缝一旦产生,碳化产物的不断积累会促进裂缝的 扩大,导致混凝土强度降低<sup>[29-30]</sup>。

与其他三种外掺材料不同的是,在快速碳化 28 d 后,添加 C-HT 的 AAM 抗压强度提高,部分原 因为 C-HT 的结构重建效应,C-HT 可使碳化后试 件的总孔体积、比表面积和凝胶孔径减小,使试件



图 1 添加不同材料对抗压强度的影响 Fig. 1 Effect of adding different materials on compressive strength

更加致密,增强抗压强度;另一方面,在结构重建 过程中,C-HT 在混合过程中储存的自由水被释 放,溶解未反应的碱性物质,进一步与留在基体中 的胶凝材料反应,因此碳化后试件抗压强度进一 步增强<sup>[31]</sup>。

#### 2.2 粉末碳化程度

利用单位时间内 CaCO<sub>3</sub> 生成量与最终 CaCO<sub>3</sub> 生成量的比值作为碳化程度,其公式如式(1)— (3)所示:

$$A = A_2 - A_1 \tag{1}$$

$$B = B_1 - A_1 \tag{2}$$

$$D = A/B \tag{3}$$

式中,A 代表粉末单位时间内 CaCO<sub>3</sub> 生成量,%;A<sub>2</sub> 代表碳化后粉末中 CaCO<sub>3</sub> 含量,%;A<sub>1</sub> 代表未碳化 时粉末中 CaCO<sub>3</sub> 含量,%;B 代表完全碳化时 Ca-CO<sub>3</sub> 生成量,%;B<sub>1</sub> 代表完全碳化后粉末中 CaCO<sub>3</sub> 含量,%;D 代表粉末碳化程度。自然碳化在 90 d 完全碳化,快速碳化在 28 d 时完全碳化。得到数 据如图2所示。

在快速碳化 0.5 d 时 M7 碳化程度为 69.73%, 抗碳化性能最好; M2 碳化程度为 82.76%,抗碳化 性能最差; M1 碳化程度为 80.43%。在自然碳化 3 d 时, M7 碳化程度为 48.41%,抗碳化性能最好; M2 碳化程度为 64.23%,抗碳化性能最差; M1 碳 化程度为 60.56%。不同试样粉末快速碳化程度 与自然碳化程度曲线规律相同,碳化程度越高,说 明其 AAM 材料的抗碳化性能越差。

添加草木灰的三组试件中, M4 的抗碳化性能 最好, M2 的最差, M2—M4 的抗碳化性能均比对照 组的差, 原因是草木灰浸出的钙离子被硅离子和 钠离子消耗, 形成了低 Ca/Si 比的 C-A-S-H 凝胶, 易于被碳化<sup>[22]</sup>。Houst 等<sup>[32]</sup>发现, 碱金属离子在 碳化过程中起着催化作用, 所以加入草木灰使钾 离子增多, 抗碳化性能变差。随着草木灰掺量的 增加, 抗碳化性能逐渐变好, 其原因是随着钾离子 的增加, 钙离子溶解度降低, 限制了 C-A-S-H 凝胶 脱钙。



Fig. 2 Degree of powder carbonisation

添加 MgO 时,不管掺量为多少均可提高抗碳 化性能,因为当胶凝材料中镁含量较高时,会形成 稳定的含镁无定形 CaCO<sub>3</sub>相,从而抑制了 C-A-S-H 凝胶脱钙,加入 MgO 会促进 Ca-Al 层状结构和 Mg-Al 水滑石的生成,吸收消耗 CO<sub>2</sub>,减少凝胶的碳化 分解。并且添加 MgO 的试件碳化后会有类水滑石 相产生,这种类水滑石相在高浓度 CO<sub>2</sub> 下可以形 成非晶态的含镁 CaCO<sub>3</sub>,由于无定形的含镁 CaCO<sub>3</sub> 溶解度较高,孔隙溶液被 Mg 和碳酸盐分子饱和, 不容易使 C-A-S-H 凝胶脱钙,因此使碳化程度 降低<sup>[11]</sup>。

添加乳酸钠时,随着掺量从 2% 增加到 4%、 6%,抗碳化性能先增加后减小,但掺量为 6%时的 抗碳化性能比掺量 2%的抗碳化性能好,总体来 看,与对照组相比,三种掺量都可以提高抗碳化性 能,原因是添加乳酸钠后,水化程度更高,产生了 更多的水化产物,对孔隙进行填充,细化了混凝土 的孔隙结构,减少了 CO<sub>2</sub> 的渗透。随着乳酸钠掺 量从 2% 增加到 4%时,抗碳化性能提高,但是,乳 酸钠掺量增加到 6%时,抗碳化性能反而降低,是 因为增加乳酸钠的含量会产生更多的 C-A-S-H 凝 胶,致使产生了更多的碳化裂纹,使得更多的 CO<sub>2</sub> 进入试件中,增加了碳化深度。

添加 C-HT 时,随着掺量从 2% 增加到 4%、 6%,抗碳化性能也越来越高,原因主要为 C-HT 的 结构重建效应,可形成类水滑石相,类水滑石相作为 缓冲体系可吸收侵入试件中的 CO<sub>2</sub>,起到了固定 CO<sub>2</sub> 的作用,延缓了 C-A-S-H 凝胶脱钙,还释放了游 离水,使之与胶凝材料进一步反应,降低了总孔隙体 积。C-HT 可使碳化后试件的总孔体积、比表面积 和凝胶孔径减小,抑制了 CO,在砂浆中的扩散。

#### 2.3 碳化深度和速率

在快速碳化不同龄期下,测得碳化深度结果 如图 3 所示,结果发现在碳化 3 d 的深度非常小, 有的试样还未完全碳化,很难测量其数值,原因是 碳化 3 d 时砂浆碱性下降较低,还未达到酚酞显无 色的程度,酚酞只能检测完全碳化区域,而未完全 碳化区域只能通过逐层磨粉法进行检测,所以基 于酚酞测试法只测量碳化 7、14、28 d 三个龄期试 件。酚酞方法有着明显缺陷,即是无法检测未完 全碳化区域,而粉末测试方法通过在快速碳化 0.5 d 时即可比较碳化程度,判断最优抗碳化材 料,做到简单高效。





目前,学者们对于混凝土碳化深度与碳化时间的关系已经达成共识,均认为碳化深度和碳化时间的平方根呈线性,根据试验结果发现 AAM 之间的碳化深度与碳化时间存在类似的规律,因此通过混凝土的基本碳化模型,建立 AAM 的碳化深度模型,见式(4)。

$$x = k\sqrt{t} \tag{4}$$

式中,x为碳化深度,mm;k为相关系数,k值取决 于混凝土的扩散率、内部碱度、二氧化碳浓度以及 暴露条件等;t为碳化时间,d。

通过上述公式对酚酞碳化深度进行拟合,结 果如图4所示,发现碳化深度模型曲线和AAM之 间的碳化深度规律相似,可以用该模型预测碳化 深度发展规律。



图 4 不同材料掺量下碳化深度拟合图像

Fig. 4 Fitted images of carbonation depth at different material doping levels



在快速碳化情况下,逐层磨粉通过从外层逐 层打磨取粉的方式测出每层 CaCO3 生成量,逐层 打磨厚度为1 mm,试块中心深度为35.35 mm。对 草木灰组 M4、MgO 组 M7、乳酸钠组 M9、C-HT 组 M13 进行逐层磨粉法测量碳化深度。得到结果如 图5 所示,该方法相对于酚酞方法有着更高的精确 度,准确测量部分碳化区的碳化深度,从而检测试 块的碳化情况。

综上两种碳化深度计算方法得出,酚酞试剂 只能测试完全碳化区,对于部分碳化区长度无法 测试,并且,通过逐层磨粉测量法获得的完全碳化 深度与酚酞测试的碳化深度比较,发现酚酞测试 的完全碳化长度偏小,即随着碳化从表层向试块 内部递进,混凝土碳化程度先大后小然后趋于平 缓,本节以完全碳化深度(X<sub>1</sub>)与 CaCO<sub>3</sub> 值稳定时 对应的深度(X<sub>2</sub>)的平均值(d<sub>1</sub>=(X<sub>2</sub>+X<sub>1</sub>)/2)作为 碳化深度值,以 d<sub>1</sub>与完全碳化深度(X<sub>1</sub>)的差值作 为部分碳化区深度,酚酞测试深度值为 d<sub>2</sub>,通过上 述的分析,本文认为 d<sub>1</sub>与 d<sub>2</sub> 均存在一定的误差, 因此两者均按权重 0.5 来计算,实际的碳化深度值



图 5 逐层磨粉法碳化深度

Fig. 5 Depth of carbonation by layer-by-layer milling method

D=0.5×d1+0.5×d2, 计算结果如图 6 所示。实际 碳化深度计算值所得出的不同 AAM 的碳化规律 与酚酞测试值得出的不同 AAM 的碳化规律基本 相同,但是酚酞测试值均比实际碳化深度计算值 要小,采用不同碳化测试方法具有相同的结论:添 加草木灰时,AAM 抗碳化性能下降,但随着草木灰 掺量增加 AAM 抗碳化性能逐渐提高; MgO、乳酸 钠、C-HT 均可提高 AAM 的抗碳化性能,添加 6% MgO 或 6%C-HT 的效果最明显,乳酸钠提升抗碳

9 • 8 \$ M2 M3 M4 7 \* **\* \* \* \* \* \* •** • 6 M5 M6 M7 M8 M9 ٠ 1 5 \* M10 M11 × M12 M13 14 28 龄期/d

Fig. 6 Calculated values of actual carbonation depth

#### 3 结论

化效果并不明显。

1) 混凝土粉末检测方法与酚酞测试方法得出 的抗碳化性能规律相同,添加草木灰会导致 AAM 抗碳化性能下降,但随着草木灰掺量增加,AAM 抗 碳化性能逐渐提高,当掺量为6%时,AAM的抗碳 化性能与对照组相差较小;添加 6% MgO 或 6% C-HT 提升抗碳化性能显著;乳酸钠对于 AAM 抗碳 化性能的提高并不显著。

2)常规碳化检测方法只能大致比较抗碳化性 能的差异,并且周期长。混凝土粉末检测方法更 加精确,尤其是在碳化早期就可以比较抗碳化性 能的差异。

3)逐层磨粉法是利用碳化会改变 CaCO<sub>3</sub> 含量 的原理来求出实际碳化深度,弥补了酚酞检测方 法无法检测部分碳化区的不足。

4)利用碳化程度方法可以比较不同变量的抗 碳化性能,尤其在碳化早期即可比较抗碳化性能, 该方法具有周期短、精准度高的优点。

### 参考文献:

[1] CHANDLER D L. Researchers have created emissions-

free cement [ C ]//World Economic Forum. United States: MIT News, 2019, 655: 656.

- [2] DUNG N T, HOOPER T J N, UNLUER C. Improving the carbonation resistance of Na2CO3-activated slag mixes via the use of reactive MgO and nucleation seeding [J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 115: 103832.
- [3] BERNAL S A, SAN NICOLAS R, MYERS R J, et al. MgO content of slag controls phase evolution and structural changes induced by accelerated carbonation in alkaliactivated binders [J]. Cement and Concrete Research, 2014, 57: 33-43.
- [4] EUGSTER H P. Sodium carbonate-bicarbonate minerals as indicators of P CO<sub>2</sub> [J]. Journal of Geophysical Research, 1966, 71(14): 3369-3377.
- [5] POUHET R, CYR M. Carbonation in the pore solution of metakaolin based geopolymer [J]. Cement and Concrete Research, 2016, 88: 227-235.
- [6] BERNAL S A, DE GUTIÉRREZ R M, PEDRAZA A L, et al. Effect of binder content on the perfor-mance of alkali-activated slag concretes [J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(1): 1-8.
- [7] DEJA J. Carbonation aspects of alkali activated slag mortars and concretes [J]. Silicates Industriels, 2002(3-4): 37-42.
- [8] PUERTAS F, PALACIOS M, VÁZQUEZ T. Carbonation process of alkali-activated slag mortars [J]. Journal of Materials Science, 2006, 41(10): 3071-3082.
- [9] DUNG N T, HOOPER T J N, UNLUER C. Improving the carbonation resistance of Na2CO3 acti-vated slag mixes via the use of reactive MgO and nucleation seeding [J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 115: 103832.
- [10] ABDEL-GAWWAD H A, ABD EL-ALEEM S. Effect of reactive magnesium oxide on properties of alkali activated slag geopolymer cement pastes [ J ]. Ceramics-Silikáty, 2015, 59(1): 37-47.
- [11] MORANDEAU A E, WHITE C E. Role of magnesiumstabilized amorphous calcium carbonate in mitigating the extent of carbonation in alkali-activated slag[J]. Chemistry of Materials, 2015, 27(19): 6625-6634.
- [12] LEE N K, KOH K T, KIM M O, et al. Physicochemical changes caused by reactive MgO in alkali-activated fly ash/slag blends under accelerated carbonation [J]. Ceramics International, 2017, 43(15): 12490-12496.
- [13] ZHOU Y, PENG Z, CHEN L, et al. The influence of two types of alkali activators on the microstructure and performance of supersulfated cement concrete: Mitigating the strength and carbonation resistance [J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 118: 103947.

(下转第48页)



2022, 35(02): 10-14.

- [12]苏佩,钱若霖,赵春晨.考虑铺装层的空心板桥荷 载横向分布系数计算[J].石家庄铁道大学学报(自 然科学版),2022,35(01):39-43.
- [13] 邬晓光,黄成,李院军,等.考虑旧桥损伤的拼宽 T
   梁桥荷载横向分布计算[J].铁道科学与工程学报,
   2019, 16(9): 2233-2239.
- [14] 胡 成,赵 砥,崔学峰.单箱多室波纹钢腹板箱梁横 向分布系数计算[J].安徽建筑大学学报,2018,26

(上接第38页)

- [14] MASOUDI R, HOOTON R D. Influence of alkali lactates on hydration of supersulfated cement [J]. Construction and Building Materials, 2020, 239: 117844.
- [15] CHEAH C B, PART W K, RAMLI M. The hybridizations of coal fly ash and wood ash for the fabrication of low alkalinity geopolymer load bearing block cured at ambient temperature [J]. Construction and Building Materials, 2015, 88: 41-55.
- [16] SHUI Z H, YU R, CHEN Y X, et al. Improvement of concrete carbonation resistance based on a structure modified Layered Double Hydroxides (LDHs): Experiments and mechanism analysis [J]. Construction and Building Materials, 2018, 176: 228-240.
- [17] COSTA D G, ROCHA A B, SOUZA W F, et al. Comparative structural, thermodynamic and electronic analyses of Zn Al An-hydrotalcite-like compounds (An<sup>-</sup>Cl<sup>-</sup>, F<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, OH<sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> or NO<sub>3</sub><sup>-</sup>): An abinitio study
  [J]. Applied Clay Science, 2012, 56: 16-22.
- [18] MASCOLO G, MASCOLO M C. On the synthesis of layered double hydroxides (LDHs) by reconstruction method based on the "memory effect" [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2015, 214: 246-248.
- [19] ZHANG M, WANG F, LONG Y, et al. Improving the carbonation resistance of alkali-activated slag mortars by calcined Mg/Al layered double hydroxides[J]. Applied Clay Science, 2022, 216: 106379.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土物理力 学性能试验方法标准: GB/ T 50081—2019 [S]. 北 京:中国建筑工业出版社, 2019.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准: GB/T 50082—2009 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2009.
- [22] BERNAL S A, PROVIS J L, BRICE D G, et al. Accelerated carbonation testing of alkali-activated binders significantly underestimates service life: The role of pore solution chemistry[J]. Cement and Concrete Research, 2012, 42(10): 1317-1326.
- [23] 范宏. 一种精密混凝土碳化测量方法: 中国,

(04): 12-16.

- [15] 李春良,林志豪,赵珞珞. 铰缝及板损伤后对空心板 桥横向受力的影响[J]. 吉林大学学报,2021,51 (02):611-619.
- [16] 李国豪,石洞. 公路桥梁荷载横向分布计算[M]. 北京:人民交通出版社, 1984.
- [17] 张学龙. 小箱梁的梁格划分及虚拟横梁刚度分析研 究[D]. 西安:长安大学, 2013.

(责任编辑 王利君)

201210534728. 3 P]. 2014-02-19.

- [24] CHINDAPRASIRT P, CHAREERAT T, HATANAKA S, et al. High-strength geopolymer using fine high-calcium fly ash[J]. Journal of Materials in Ci-vil Engineering, 2011, 23(3): 264-270.
- [25] WONGPA J, KIATTIKOMOL K, JATURAPI-TAKKUL C, et al. Compressive strength, modulus of elasticity, and water permeability of inorganic polymer concrete[J]. Materials & Design, 2010, 31(10): 4748-4754.
- [26] AL-ESAIMI M M. Catalytic reaction by hydrotalcites (I): Polymerization of methyl methacrylate[J]. International Journal of Polymeric Materials, 2000, 45(1-2): 55-68.
- [27] SHUI Z H, YU R, CHEN Y X, et al. Improvement of concrete carbonation resistance based on a structure modified Layered Double Hydroxides (LDHs): Experiments and mechanism analysis [J]. Construction and Building Materials, 2018, 176: 228-240.
- [28] KROPP T H A B J, HILSDORF H K. Formation of silica gel during carbonation of cementitious systems containing slag cements[J]. Special Publication, 1989, 114: 1413-1428.
- [29] AUROY M, POYET S, LE BESCOP P, et al. Impact of carbonation on unsaturated water transport properties of cement-based materials [J]. Cement and Concrete Research, 2015, 74: 44-58.
- [30] XUE Q, ZHANG L, MEI K, et al. Evolution of structural and mechanical properties of concrete exposed to high concentration CO<sub>2</sub> [J]. Construction and Building Materials, 2022, 343: 128077.
- [31] LIU S, HAO Y, MA G. Approaches to enhance the carbonation resistance of fly ash and sla-g based alkali-activated mortar-experimental evaluations [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 280: 124321.
- [32] HOUST Y F, WITTMANN F H. Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(12): 1923-1930. (责任编辑 王利君)